Исследование эмиссионных спектров Cl-, Br-, I-содержащих мишеней в спектральном диапазоне 3–6.5 нм при возбуждении импульсным лазерным излучением

В.Е.Гусева, С.А.Гарахин, А.Н.Нечай, А.А.Перекалов, Н.Н.Цыбин, Н.И.Чхало

Описаны результаты исследования эмиссионных спектров Cl-, Br- и I-содержащих жидкоструйных мишеней в диапазоне длин волн 3–6.5 нм при возбуждении импульсным лазерным излучением. Зарегистрирован ряд эмиссионных линий ионов Cl, Br, I, в том числе в диапазоне «окна прозрачности воды» 2.3–4.4 нм. Для формирования жидкоструйной мишени использовалась специально разработанная система на основе промышленного импульсного клапана. Для возбуждения мишеней использовался Nd:YAG-лазер (λ = 1064 нм, τ = 5.2 нс, E_{pulse} = 0.8 Дж). С помощью брэгговского спектрометра на основе многослойного рентгеновского Cr/Sc-зеркала и абсорбционных Ti/Be-фильтров были измерены абсолютные интенсивности некоторых наиболее интенсивных линий. Продемонстрирована высокая эмиссионная способность жидкостных мишеней; так, для бромсодержащей мишени в полосе 6.12 ± 0.05 нм полученная интенсивность излучения в полупространство составила 1.3×10^{13} фотон./имп.

Ключевые слова: *газовые струи, мягкое рентгеновское излучение, экстремальное ультрафиолетовое излучение, эмиссионные спектры, лазерная искра.*

1. Введение

В настоящее время активно развиваются исследования, в которых востребованы источники излучения в мягком рентгеновском (МР) диапазоне длин волн, например исследования в области мягкой рентгеновской микроскопии биологических образцов [1, 2]. В ИФМ РАН ведутся работы по созданию микроскопа для исследования биологических образцов в спектральном диапазоне МР излучения [3, 4]. Для успешного развития исследований в данном направлении необходим источник МР излучения в спектральном диапазоне «окна прозрачности воды» 2.3 – 4.4 нм. Синхротронные источники рентгеновского излучения, характеризующиеся высокой яркостью и интенсивностью излучения, представляют собой исследовательские комплексы больших размеров; работа с ними возможна только в рамках коллективного использования научного оборудования. Рентгеновские трубки, имеющие компактные размеры, характеризуются относительно низкой интенсивностью в МР области спектра и поэтому используются, как правило, в жесткой рентгеновской области спектра.

В настоящее время наиболее подходящими источниками МР излучения для лабораторных приложений являются лазерно-плазменные источники (ЛПИ). Так, в работе [5] исследуется ЛПИ, излучающий на длине волны 13.5 нм. В данной работе отмечается, что для получения интенсивного эмиссионного излучения на указанной длине волны оптимально получить плазму, в которой концентрация ионов составляет 10^{17}–10^{19} см$^{-3}$, а температура – на уровне 20–90 эВ. Таким образом, ясно, что для получения высокоинтенсивного излучения в экстремальной ультрафиолетовой (ЭУФ) и МР областях спектра и, в частности, в окне прозрачности воды 2.3–4.4 нм необходимо формирование в ЛПИ плотной высокотемпературной плазмы. Формирование подобной плазмы происходит при выполнении следующих условий: возбуждение мишени осуществляется лазерным излучением высокой мощности и используется плотная мишень, эффективно поглощающая излучение лазера.

Ранее широко исследовались ЛПИ с твердотельными мишенями [5–7]. Твердотельные мишени обладают высокой плотностью и ярким эмиссионным излучением, однако при их возбуждении лазерным излучением происходит распыление вещества мишени в вакуумной камере и загрязнение оптических элементов установки. В основном исследования твердотельных мишеней были посвящены изучению мишеней из олова и лития для разработки источника излучения на длине волны 13.5 нм в целях ЭУФ литографии. Мишени, состоящие из других химических элементов, изучены в меньшей степени.

В работах [8–11] были исследованы газоструйные мишени. Преимущество использования газоструйных мишеней состоит в существенно меньшем загрязнении поверхностей оптических элементов продуктами эрозии мишеней, однако такие мишени обладают существенно меньшей плотностью, менее эффективно поглощают лазерное излучение, и, следовательно, их эмиссионное излучение гораздо менее яркое. Некоторое количество работ посвящено исследованию абсолютных интенсивностей и конверсионной эффективности лазерно-плазменного источника ЭУФ излучения на основе ксенона (см., напр., [12, 13]) и криптона [14]. Для газоструйных мишеней также проводились исследования эмиссионных спектров в более коротковолновом диапазоне, в том числе в окне прозрачности воды 2.3–4.4 нм [9, 15, 16]; ряд работ, относящихся к данному спектральному диапазону, посвящен измерениям абсолютных интенсивностей [9, 17–19].

В.Е.Гусева, С.А.Гарахин, А.Н.Нечай, А.А.Перекалов, Н.Н.Цыбин, Н.И.Чхало. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603087 Нижегородская область, Кстовский район, дер. Афонино, Академическая ул., 7; e-mail: perekalov@ipmras.ru

Поступила в редакцию 20 февраля 2023 г., после доработки – 13 апреля 2023 г.

Жидкостные мишени занимают промежуточное положение между газовыми и твердотельными мишенями и являются достаточно перспективными для ЛПИ. При использовании жидкостных мишеней также возможно зарегистрировать эмиссионное излучение ряда химических элементов, труднодоступных в газовой фазе. В качестве жидкостных мишеней для ЛПИ обычно используют капельные мишени, струи постоянного истечения и криогенные жидкостные струи. Исследованиям эмиссионных спектров капельных мишеней посвящены работы [20–23]. Работы с жидкостными струями постоянного истечения описаны в [24, 25]. Эмиссионные свойства криогенных жидкостных струй при импульсном лазерном возбуждении исследованы в [26–28].

В большинстве работ по разработке лазерно-плазменных источников излучения используются Nd:YaG-лазеры с длительностью импульса 0.5–10 нс и энергией импульса ~1 Дж [9]. Такой выбор обусловлен по большей части широкой доступностью и относительной простотой работы с данными лазерами. Лазеры с длительностью импульса в несколько пикосекунд либо несколько сотен фемтосекунд хотя и позволяют получить гораздо бóльшую плотность мощности в фокусе, но менее распространены в лабораторной технике. Второй тип достаточно распространенных лазеров – CO_2-лазеры. В сравнении с Nd:YAG-лазерами лазеры на основе углекислоты характеризуются более длительными импульсами порядка нескольких десятков наносекунд, в связи с чем получаемая плотность мощности значительно ниже.

В настоящей работе представлены результаты исследования эмиссионных спектров галогенсодержащих жидкоструйных мишеней в спектральном диапазоне 3–7 нм. Основное отличие от проводимых ранее исследований состоит в том, что впервые были зарегистрированы эмиссионные спектры лазерной плазмы, содержащей ионы галогенов Cl, Br, I в спектральном диапазоне окна прозрачности воды 2.3–4.4 нм, а также получены значения абсолютных интенсивностей зарегистрированных эмиссионных линий.

В число задач проведенных исследований входили: исследование эмиссионных спектров галогенсодержащих мишеней в спектральном диапазоне 3–6.5 нм; идентификация зарегистрированных эмиссионных линий либо полос; измерение абсолютных интенсивностей эмиссионного излучения.

2. Экспериментальное оборудование

Экспериментальная работа проводилась на исследовательской установке, конструкция и принципы работы которой подробно описаны в [29]. Формирование жидкостной струи осуществлялось с помощью импульсного клапана на основе форсунки Bosch 0 280 158 017. Давление жидкости на входе в импульсный клапан составляло 4 бар, длительность импульса открытия клапана – 300 мкс. Возбуждение жидкой струи-мишени осуществлялось с помощью сфокусированного излучения Nd:YaG-лазера; длительность импульса на полувысоте интенсивности составляла 5.2 нс, энергия импульса – 0.8 Дж, плотность мощности лазерного излучения в пятне фокусировки – примерно 5×10^{12} Вт/см^2. Спектры МР излучения плазмы регистрировалисьс помощью решеточного спектрометра-монохроматора скользящего падения РСМ-500. В эксперименте использовалась сферическая дифракционная решетка 600 штр/мм с радиусом кривизны 4 м. Спектральное разрешение составляло 0.04 нм.

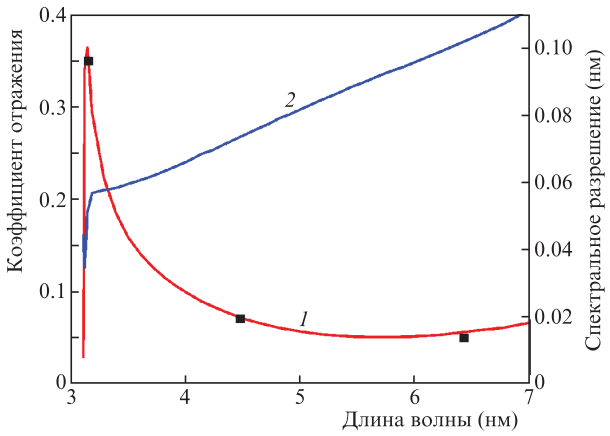

Рис.1. Зависимости коэффициента отражения (*1*) и спектральной селективности (*2*) для используемого Cr/Sc-МРЗ от длины волны. Черные квадраты – измеренные на рефлектометре коэффициенты отражения МРЗ.

Для измерения абсолютных интенсивностей эмиссионного излучения применялся брэгговский спектрометр с абсолютной калибровкой. Монохроматором служило многослойное рентгеновское Cr/Sc-зеркало (МРЗ). Для подавления длинноволнового излучения использовались два пленочных Ti/Be-фильтра, установленные на входе брэгговского спектрометра и перед детектором. В диапазоне длин волн 3–6.5 нм коэффициент отражения МРЗ изменялся в пределах 35%–5%. Зависимости коэффициента отражения и спектральной селективности используемого Cr/Sc-МРЗ от длины волны приведены на рис.1.

Пропускание одиночного Ti/Be-фильтра в зависимости от длины волны составляло 80% – 25% [30]. Такая комбинация зеркала и фильтров позволяла уверенно регистрировать эмиссионное излучение плазмы в спектральном диапазоне 3 – 6.5 нм, и при этом эффективно подавлялась более длинноволновая составляющая излучения плазменного облака. Принципы работы, конструкция и характеристики прибора подробно описаны в [31].

3. Методика расчета абсолютных интенсивностей

Методика определения энергии и числа фотонов, излучаемых лазерной искрой в определенной спектральной полосе, приведена в работе [31]. Для непосредственно проведенных в данной работе экспериментов энергия и число фотонов рассчитывались по следующим формулам:

$$E = \frac{4\pi\alpha V}{\gamma\delta R T^2}, \qquad N = E\frac{\lambda_0}{hc},$$

где E [Дж] – энергия, излучаемая лазерной искрой в полосе, соответствующей разрешению брэгговского спектрометра; λ_0 – длина волны максимума сигнала в исследуемой спектральной полосе; $\alpha = 10^{-11}$ Кл/В – чувствительность усилителя; V [В] – сигнал, регистрируемый фотодиодом; $\gamma = 5.45 \times 10^{-5}$ ср – телесный угол, под которым излучение искры видно из детектора; $\delta = 0.25$ Кл/Дж – чувствительность фотодиода [32]; R – коэффициент отражения Cr/Sc-МРЗ на длине волны λ_0; T – коэффициент пропускания пленочных Ti/Be-фильтров на длине волны λ_0; h – постоянная Планка; c [м/с] – скорость света.

Стоит также отметить, что в случае, когда в исследуемую спектральную полосу попадает только отдельно стоящая узкая эмиссионная линия, измеренная по описанной методике, абсолютная интенсивность будет соответствовать интенсивности данной линии. Во всех остальных случаях речь идет только об интенсивности в спектральной полосе, определяемой разрешением брэгговского спектрометра. Разрешение спектрометра определяется свойствами используемого МРЗ; влияние конечных размеров входного отверстия и диафрагмы, а также механической точности позиционирования МРЗ несущественно.

4. Экспериментальные результаты

4.1. Исследования спектров хлорсодержащей мишени

В качестве мишени использовался дихлорметан CH_2Cl_2 – прозрачная, легколетучая, малотоксичная жидкость с малой реакционной способностью в условиях эксперимента. Данная жидкость эффективно откачивается криогенными насосами, что делает ее достаточно удобной мишенью для исследований и дальнейшего использования в ЛПИ. Дихлорметан ранее исследовался нами в качестве мишени для ЛПИ в более длинноволновой части спектра [33].

На рис.2 приведен эмиссионный спектр дихлорметана, зарегистрированный с помощью спектрометра РСМ-500 в диапазоне 3–6.5 нм. В эмиссионном спектре наблюдается ряд высокоинтенсивных эмиссионных линий ионов Cl VIII, Cl IX, Cl XII; также зарегистрирована эмиссионная линия ионов C VI на длине волны 3.37 нм. Идентификация эмиссионных линий проведена в соответствии с работами [34–36]. Полученные результаты представлены в табл.1.

По результатам измерений, проведенных на брэгговском спектрометре, были определены абсолютные интенсивности ряда эмиссионных линий. В табл.2 приведены значения энергии W и числа фотонов N, излучаемых лазерной искрой в полусферу (в телесный угол 2π ср) за время одного лазерного импульса, в полосе, спектральная ширина которой соответствует полуширине кривой отражения используемого в брэгговском спектрометре Cr/Sc-МРЗ, либо в линии, если ее спектральная ширина меньше спектрального разрешения спектрометра.

По данным, представленным в табл.2, можно сделать вывод, что при использовании дихлорметана в качестве

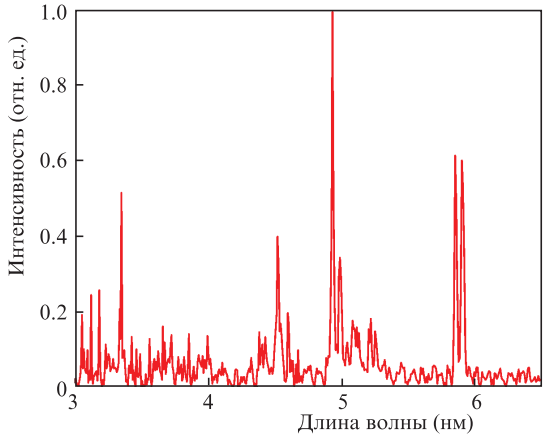

Рис.2. Эмиссионный спектр CH_2Cl_2, полученный с помощью спектрометра РСМ-500.

Табл.1. Эмиссионные линии CH_2Cl_2.

Длина волны (нм)	Интенсивность (отн. ед.)	Ион	Переход
3.01	0.19	Cl XIV	$1s^22p^2 – 1s^22p3d$
3.12	0.24	Cl XII	$1s^22s^22p – 1s^22s^23d$
3.144	0.25	Cl XII	$1s^22s^22p – 1s^22s^23d$
3.37	0.52	C VI	1s – 2p
4.44	0.4	Cl VIII	$2s^22p^6 – 2s^22p^54s$
4.95	1	Cl VIII	$2s^22p^6 – 2s^22p^53d$
5.01	0.35	Cl VIII	$2s^22p^6 – 2s^22p^53d$
5.1	0.18	Cl IX	$2s^22p^5 – 2s^22p^43s$
5.2	0.2	Cl IX	$2s^22p^5 – 2s^22p^43s$
5.23	0.15	Cl IX	$2s^22p^5 – 2s^22p^43s$
5.27	0.15	Cl IX	$2s^22p^5 – 2s^22p^43s$
5.87	0.61	Cl VIII	$2s^22p^6 – 2s^22p^53s$
5.92	0.6	Cl VIII	$2s^22p^6 – 2s^22p^53s$

Табл.2. Абсолютные интенсивности эмиссионных линий CH_2Cl_2.

Длина волны (нм)	Ион	W (Дж)	N (фотон./имп.)
5.92 ± 0.05	Cl VIII	3.45×10^{-4}	1×10^{13}
4.95 ± 0.04	Cl VIII	1.8×10^{-4}	4.5×10^{12}
4.44 ± 0.038	Cl VIII	1×10^{-4}	2.3×10^{12}
3.37 ± 0.03	C VI	4.6×10^{-5}	0.8×10^{12}

идкостной мишени интенсивность эмиссионного излучения плазмы в окне прозрачности воды достаточно высокая. Интенсивность излучения эмиссионной линии ионов C VI на длине волны 3.37 нм сравнима с интенсивностью, полученной в работе [21] при возбуждении жидкоструйной мишени на основе спирта.

Интенсивность эмиссионного излучения в более длинноволновой части спектра 4.4 – 6 нм несколько выше, чем в работе [26], где исследовалась криогенная мишень из жидкого аргона. Исследованный нами эмиссионный спектр хлора подобен спектру аргона, при этом линии хлора несколько смещены относительно линий аргона в длинноволновую область согласно закону Мозли. Поскольку авторы [26] для возбуждения мишени использовали лазерное излучение, на порядок более мощное, чем в настоящей работе, можно говорить о том, что в исследованном спектральном диапазоне эффективность жидкоструйной мишени из дихлорметана значительно выше, чем у криогенной мишени из аргона.

4.2. Исследования спектров бромсодержащей мишени

Для исследования эмиссионных спектров брома в качестве мишени использовался бромистый метилен CH_3Br – тяжелая, малотоксичная жидкость с низкой реакционной способностью в наших экспериментальных условиях. Данная жидкость легко откачивается из вакуумной камеры криогенными насосами, что делает ее достаточно удобной мишенью для исследований и дальнейшего использования в ЛПИ. Бромистый метилен ранее был исследован нами в качестве мишени для ЛПИ в более длинноволновой области спектра [33].

На рис.3 показан эмиссионный спектр бромистого метилена, зарегистрированный с помощью спектрометра-монохроматора РСМ-500 в диапазоне 3–6.5 нм. В спектре наблюдается ряд высокоинтенсивных эмиссион-

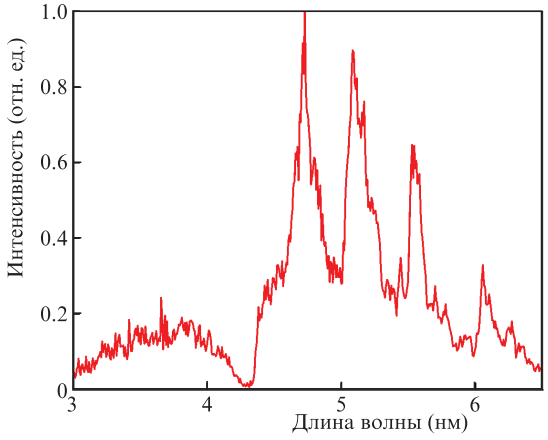

Рис.3. Эмиссионный спектр бромистого метилена, зарегистрированный с помощью спектрометра РСМ-500.

ных полос ионов Br XII – Br XV. Эмиссионные линии ионов углерода в водном окне прозрачности не зарегистрированы. Идентификация эмиссионных линий проведена в соответствии с [37, 38]. Полные результаты представлены в табл.3. В полученном эмиссионном спектре также имеется провал интенсивности в спектральной области вблизи 4.4 нм. Подобная картина наблюдалась на эмиссионном спектре Xe, полученном в работе [16]. Причины, приводящие к данному эффекту, пока не ясны.

По результатам измерений, проведенных на брэгговском спектрометре, были определены абсолютные интенсивности ряда наиболее интенсивных эмиссионных линий CH_3Br. В табл.4 приведены значения энергии и числа фотонов, излучаемых лазерной искрой в полусферу (телесный угол 2π ср) за время одного лазерного импульса, в полосе, спектральная ширина которой соответствует полуширине кривой отражения от используемого в брэгговском спектрометре Cr/Sc-MP3.

По данным, представленным в табл.4, можно сделать вывод, что при использовании бромистого метилена в качестве жидкостной мишени интенсивность эмиссионного излучения плазмы в диапазоне длин волн 4.5 – 7 нм достаточно высока и сравнима с интенсивностью, полученной нами при использовании в качестве мишени дихлорметана. В целом эмиссионный спектр ионов брома в исследованном спектральном диапазоне подобен спектрам криптона в [16, 19]. Стоит отметить, что авторам не удалось найти более ранних работ, в которых проводились исследования эмиссионных спектров бромистого метилена в спектральном диапазоне 3 – 7 нм, поэтому провести сравнение эффективности исследованного источника с другими весьма затруднительно.

Табл.3. Эмиссионные линии CH_3Br.

Длина волны (нм)	Интенсивность (отн. ед.)	Ион	Переход
4.7	1	Br XIV	$3d^4 - 3d^3 4f$
5.18	0.9	Br XIII	$3d^5 - 3d^4 4f$
5.55	0.65	Br XII	$3d^6 - 3d^5 4f$
6.12	0.33	Br XI	$3d^7 - 3d^6 4f$

Табл.4. Абсолютные интенсивности эмиссионных линий CH_3Br.

Длина волны (нм)	Ион	W (Дж)	N (фотон./имп.)
4.7 ± 0.04	Br XIV	2.2×10^{-4}	5×10^{12}
5.18 ± 0.043	Br XIII	1.8×10^{-4}	4.6×10^{12}
5.55 ± 0.045	Br XII	3.5×10^{-4}	1×10^{13}
6.12 ± 0.05	Br XI	4.1×10^{-4}	1.3×10^{13}

4.3. Исследования спектров иодтрифторэтана

Для исследования эмиссионных спектров иода в качестве мишени использовался иодтрифторэтан CF_3CH_2I – тяжелая, малотоксичная жидкость с низкой реакционной способностью в наших экспериментальных условиях. Данная жидкость легко откачивается из вакуумной камеры криогенными насосами, что делает ее достаточно удобной мишенью для исследований и дальнейшего использования в ЛПИ. Насколько известно авторам, эмиссионные спектры лазерной плазмы, содержащей ионы иода, в указанном спектральном диапазоне ранее не исследовались.

На рис.4 приведен эмиссионный спектр иодтрифторэтана, зарегистрированный с помощью спектрометра-монохроматора РСМ-500 в диапазоне 3 – 6.5 нм. В спектре наблюдается высокоинтенсивное широкополосное излучение ионов иода с максимумом на длине волны 4.6 нм, видны узкие эмиссионные линии ионов C VI на длинах волн 3.37 и 3.49 нм и эмиссионная линия ионов C V на длине волны 4.026 нм, а также наблюдается «провал» вблизи длины волны 4.4 нм, как и в спектре бромистого метилена. Надежно идентифицировать ионы иода, в которых формируется зарегистрированное излучение, не удалось в связи с практически полным отсутствием литературных данных по соответствующим спектрам. Результаты проведенной нами идентификации эмиссионного излучения иодтрифторэтана приведены в табл.5.

По аналогии с предыдущими случаями в табл.6 приведены абсолютные интенсивности ряда наиболее интенсивных эмиссионных линий.

По данным табл.6 можно сделать вывод, что использование иодтрифторэтана в качестве жидкостной мишени в ЛПИ достаточно перспективно. Интенсивность излучения эмиссионных линий ионов углерода в водном окне прозрачности (длины волн 4.026, 3.49 и 3.37 нм) сравнима и даже несколько превышает интенсивности излучения, полученные в работе [21] при использовании спирта в качестве жидкоструйной мишени. Стоит также отметить, что не удалось найти более ранних работ, в ко-

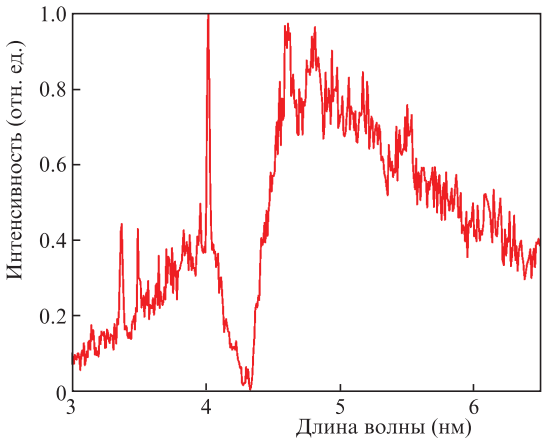

Рис.4. Эмиссионный спектр CF_3CH_2I, полученный с помощью спектрометра РСМ-500.

Табл.5. Эмиссионные линии иодтрифторэтана.

Длина волны (нм)	Интенсивность (отн. ед.)	Ион	Переход*
4.6	0.97	I	–
4.026	1	CV	$1s^2 – 1s2p$
3.49	0.43	CVI	$1s^2 – 2s3p$
3.37	0.45	CVI	$1s – 3d^6 4f$

*Прочерк в графе означает, что данный переход не удалось однозначно идентифицировать.

Табл.6. Абсолютные интенсивности эмиссионных линий иодтрифторэтана.

Длина волны (нм)	Ион	W (Дж)	N (фотон./имп.)
4.60 ± 0.039	I	4.7×10^{-4}	1.1×10^{13}
4.026 ± 0.035	CV	2.2×10^{-4}	4.4×10^{12}
3.49 ± 0.031	CVI	1.2×10^{-4}	2.1×10^{12}
3.37 ± 0.03	CVI	1.2×10^{-4}	2×10^{12}

торых проводились исследования эмиссионных спектров лазерной плазмы, содержащей ионы иода в спектральном диапазоне 3–7 нм, поэтому сравнить эффективность исследованного источника с другими весьма затруднительно.

5. Заключение

В рамках данной работы были проведены исследования эмиссионных спектров жидкостных струй дихлорметана, бромистого метилена и иодтрифторэтана при возбуждении лазерными импульсами наносекундной длительности в спектральном диапазоне 3–7 нм, а также проведена идентификация зарегистрированных эмиссионных линий и полос.

В диапазоне длин волн 3–7 нм впервые получены эмиссионные спектры лазерной плазмы, содержащей ионы Br и I, а также впервые определены абсолютные интенсивности зарегистрированного излучения. На основе сравнения полученных результатов с литературными данными сделан вывод о том, что эффективность исследованных жидкоструйных мишеней для ЛПИ в спектральном диапазоне 3–7 нм достаточно высока и в ряде случаев превышает эффективность ранее исследованных газоструйных и криогенных жидкоструйных мишеней.

Полученные результаты могут быть использованы при конструировании лабораторных ЛПИ для различных приложений, например для мягкой рентгеновской микроскопии в окне прозрачности воды 2.3–4.4 нм или для рефлектометрии многослойных рентгеновских зеркал.

Работа поддержана НЦМУ «Центр фотоники» при финансировании Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2022-316).

1. Berglund M., Rymell L., Peuker M., Wilhein T., Hertz H.M. *J. Microscopy*, **197** (3), 268 (2000).
2. Hanssen E., Knoechel C., Dearnley M., Dixon M.W., Le Gros M., Larabell C., Tilley L. *J. Struct. Biol.*, **177** (2), 224 (2012).
3. Малышев И.В., Пестов А.Е., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н., Торопов М.Н., Чхало Н.И. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **1**, 3 (2019).
4. Malyshev I.V., Reunov D.G., Chkhalo N.I., Toropov M.N., Pestov A.E., Polkovnikov V.N., Shirokova O.M. *Opt. Express*, **30** (26), 47567 (2022).
5. Абраменко Д.Б., Анциферов П.С., Астахов Д.И., Виноходов А.Ю., Вичев И.Ю., Гаязов Р.Р., Якушкин А.А. *УФН*, **189** (3), 323 (2019).
6. Rakowski R., Mikołajczyk J., Bartnik A., Fiedorowicz H., de Gaufridy de Dortan F., Jarocki R., Wachulak P. *Appl. Phys. B*, **102** (3), 559 (2011).
7. Fomenkov I., Brandt D., Ershov A., Schafgans A., Tao Y., Vaschenko G., Brown D. *Adv. Opt. Technol.*, **6** (3–4), 173 (2017).
8. Fiedorowicz H., Bartnik A., Szczurek M., Daido H., Sakaya N., Kmetik V., Wilhein T. *Opt. Commun.*, **163** (1–3), 103 (1999).
9. Wachulak P.W., Bartnik A., Fiedorowicz H., Rudawski P., Jarocki R., Kostecki J., Szczurek M. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **268** (10), 1692 (2010).
10. Kranzusch S., Mann K. *Opt. Commun.*, **200** (1–6), 223 (2001).
11. Holburg J., Müller M., Mann K., Wieneke S. *J. Vacuum Sci. Technol. A*, **37** (3), 031303 (2019).
12. Chkhalo N.I., Garakhin S.A., Lopatin A.Y., Nechay A.N., Pesto A.E., Polkovnikov V.N., Zuev S.Y. *AIP Advances*, **8** (10), 105003 (2018).
13. Rakowski R., Bartnik A., Fiedorowicz H., de Gaufridy de Dortan F., Jarocki R., Kostecki J., Wachulak P. *Appl. Phys. B*, **101** (4), 773 (2010).
14. Нечай А.Н., Гарахин С.А., Лопатин А.Я., Полковников В.Н., Реунов Д.Г., Салащенко Н.Н., Цыбин Н.Н. *Квантовая электроника*, **50** (4), 408 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (4), 408 (2020)].
15. Müller M., Kühl F.C., Großmann P., Vrba P., Mann K. *Opt. Express*, **21** (10), 12931 (2013).
16. Mey T., Rein M., Großmann P., Mann K. *New J. Phys.*, **14** (7), 073045 (2012).
17. Fiedorowicz H., Bartnik A., Jarocki R., Szczurek M., Wilhein T. *Appl. Phys. B*, **67** (3), (1998).
18. Legall H., Blobel G., Stiel H., Sandner W., Seim C., Takman P., Diete W. *Opt. Express*, **20** (16), 18362 (2012).
19. Гусева В.Е., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. *ЖТФ*, **92** (8) (2022).
20. Malmqvist L., Rymell L., Hertz H.M. *Appl. Phys. Lett.*, **68** (19), 2627 (1996).
21. Rymell L., Hertz H.M. *Opt. Commun.*, **103** (1–2), 105 (1993).
22. Hertz H.M., Rymell L., Berglund M., Malmqvist L. *Proc. SPIE*, **2523**, 88 (1995).
23. Hertz H.M., Berglund M., Johansson G.A., Peuker M., Wilhein T., Brismar H. *AIP Conf. Proc.*, **507** (1), 721 (2000).
24. Vogt U., Stiel H., Will I., Nickles P.V., Sandner W., Wieland M., Wilhein T. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (15), 2336 (2001).
25. De Groot J., Hemberg O., Holmberg A., Hertz H.M. *J. Appl. Phys.*, **94** (6), 3717 (2003).
26. Wieland M., Faubel M., Schmidt M., Vogt U., Wilhein T. *Proc. SPIE*, **4504**, 62 (2001).
27. Hansson B.A.M., Rymell L., Berglund M., Hertz H.M. *Microelectron. Eng.*, **53** (1–4), 667 (2000).
28. Wieland M. et al. *Appl. Phys. B*, **72** (5), 591(2001).
29. Нечай А.Н., Перекалов А.А., Чхало Н.И., Салащенко Н.Н., Забродин И.Г., Каськов И.А., Пестов А.Е. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **9**, 83 (2019).
30. Барышева М.М., Гарахин С.А., Лопатин А.Я., Лучин В.И., Малышев И.В., Салащенко Н.Н., Цыбин Н.Н., Чхало Н.И. *ЖТФ*, **92** (8), 1130 (2022).
31. Водопьянов А.В., Гарахин С.А., Забродин И.Г., Зуев С.Ю., Лопатин А.Я., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Чхало Н.И. *Квантовая электроника*, **51** (8), 700 (2021) [*Quantum Electron.*, **51** (8), 700 (2021)].
32. Аруев П.Н., Барышева М.М., Бер Б.Я., Забродская Н.В., Забродский В.В., Лопатин А.Я., Чхало Н.И. *Квантовая электроника*, **42** (10), 943 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (10), 943 (2012)].
33. Гусева В.Е., Нечай А.Н., Перекалов А.А., Салащенко Н.Н., Чхало Н.И. *Оптика и спектроскопия*, **130** (7), 991 (2022).
34. NIST Atomic Spectra Database, Gaithersburg, 2009–2023; https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database.
35. Berry H.G., Desesquelles J., Cheng K.T., Schectman R.M. *Phys. Rev. A*, **18** (2), 546 (1978).
36. Kaufman V., Edlén B. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **3** (4), 825 (1974).
37. Joshi Y.N., van Kleef T.A.M. *Phys. Scr.*, **23** (3), 249 (1981).
38. Van Kleef T.A., Uylings P.H.M., Ryabtsev A.N., Podobedova L.I., Joshi Y.N. *Phys. Scr.*, **37** (3), 342 (1988).